

解 説

## クモの命綱は力学的に安全か？

大 崎 茂 芳<sup>1)</sup>

### 1. はじめに

蜘蛛が空中戦を通じて巣に捕えた大きな蟬や蛾などを糸でつり上げたり、細い糸に垂れ下がったりしているシーンを見ることがしばしばある。その捕獲の鮮やかさに見とれたり、非常に細い牽引糸がなぜ切れないで、蜘蛛の全体重を支えているのかなど不思議に思うことが多い。このように、蜘蛛の腹から分泌する牽引糸は、死と直面しながら空中戦を演じる蜘蛛にとって、日常生活に不可欠な生命線（命綱）そのものである。

命綱である蜘蛛の牽引糸の物理的特性は、古くから力学的性質や物理化学的性質が調べられてきた（Denny 1976, Work & Morosoff 1982, Cunniff, Fossey, Auerbach & Song 1995）。また、著者は、牽引糸のサンプル採取法を確立し、熱的性質（Osaki 1989a）、光学的性質（Osaki 1989b）、劣化特性（Osaki 1994, 1997）を調べてきた。力学的に強いという特徴を持つ蜘蛛糸に関しては、応力-歪曲線から破断強度が（Becker, Mahony, Lenhert, Kaplan & Adams 1995）、また、力学的には分子配向（Osaki 1990）が議論されてきた。しかし、命綱として蜘蛛の体重を支える牽引糸の力学的安全性は議論されていなかった。

ここでは、命綱の役割を果たす牽引糸を通じて死と直面しながら活動している蜘蛛の安全性を、牽引糸の力学強度と蜘蛛の体重との関係から議論する。

### 2. 方 法

木から自然落下させた時に分泌するジョロウグモ（*Nephila clavata*）の牽引糸をサンプルとして採取した。牽引糸の応力-歪曲線は TENSILON によって得た。応力-歪曲線において、線形領域から非線形領域へ移行する境界値を弾性限界強度、破断点での応力を破断強度と定義する（Osaki 1996b）。引張速度  $3.3 \times 10^{-4}$  m/s における測定データの信頼性を高めるために、弾性限界強度および破壊強度のデータは 3 回測定した平均値をとるとともに、 $1.7 \times 10^{-4}$  m/s ~  $3.3 \times 10^{-3}$  m/s の範囲の引張り速度で測定したデータの引張り速度依存性を求めた。

牽引糸の構造は、走査型電子顕微鏡によって観測した。蜘蛛の体を支えている牽引糸は、目視で 1 本に見えるが、電子顕微鏡では 2 本の細いフィラメントから構成されていることがわかる（図 1 参照）。それも、お互いに側面でくつつ

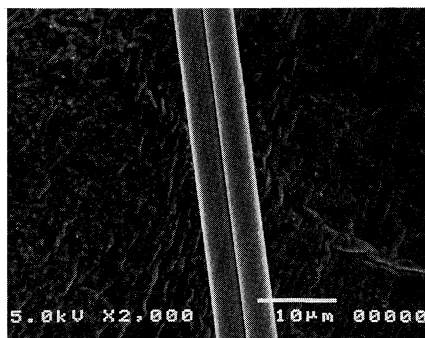


図 1. Draglines for *Nephila clavata* observed by scanning electron microscope.

1) Shimane University, Matsue, Shimane 690-8504, Japan  
島根大学, 〒690-8504 松江市西川津町 1060

いている。この牽引糸は、結晶性は非常に悪いが一軸配向性を示す。

### 3. 結 果

#### 3.1 蜘蛛の破断点は複数個か？

ジョロウグモの牽引糸は応力 (Stress) の増大とともに歪 (Strain) が直線的に大きくなり、伸びが約 3% で弾性限界強度 (elastic limit strength) となり、その値を超えると非線形の挙動を示す。応力が増大して、伸びが約 20% 程度で破断点が見られる (図 2 参照)。破断点は 1 個ではなく 2 個である。従来では、この種の複数個の破断点は観測されていない。牽引糸の 2 本のフィラメントは断面は円であり、非常に似ているが全く同一の直径ではない。したがって、2 本のフィラメントが同時に破断する確率が小さいために 2 個の破断点が観測されるのである (Osaki 1996a)。

#### 3.2 弾性限界強度は蜘蛛の重さの約 2 倍！

体重の異なったジョロウグモの牽引糸における弾性限界強度 (ES) を図 3 に示す。この弾性限界強度は、いつでも体重の約 2 倍に相当することが判った。また、破断強度 (BS) も体重 (W) の増加とともに直線的に増大し、破断強度は蜘蛛の体重の約 6 倍に相当することがわかった。

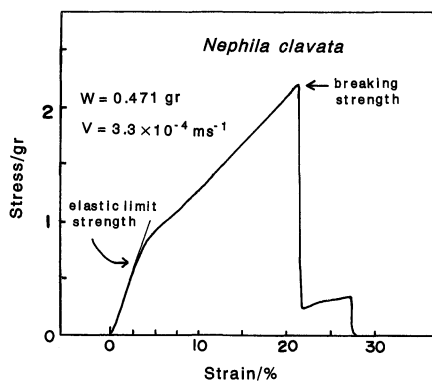


図 2. Stress-Strain curve obtained for drag-line of a *Nephila clavata* spider with a weight of 471 mg and a stretching velocity of  $3.3 \times 10^{-4}$  m/s.

図 1 に示したように、二本のフィラメントから成りたっている牽引糸の弾性限界強度が体重の 2 倍ということは、たとえ 1 本のフィラメントが切れても、残りの 1 本で体重を支えることが可能となる。このように、牽引糸は効率的な命綱であることがわかった (Osaki 1996a, 1996b)。

蜘蛛の命綱は人間から見ると極めて巧妙に作り上げられているように思える。これは、進化の産物と思われる。たとえば、蜘蛛の自重以下の獲物であれば捕獲して、牽引糸で容易に吊り上げることが可能である。それ以上の重さであれば要注意である。蜘蛛の体重 5 倍近くの獲物であれば牽引糸がいつ破断してもおかしくない状態なのである。

#### 3.3 蜘蛛は獲物の重さが判る？

コガネグモが自重よりかなり大きな蟬を巣に捕えた時は、蜘蛛は何回も糸を蟬に巻きつけに降りては、また昇り、何本もの糸で補強した後、

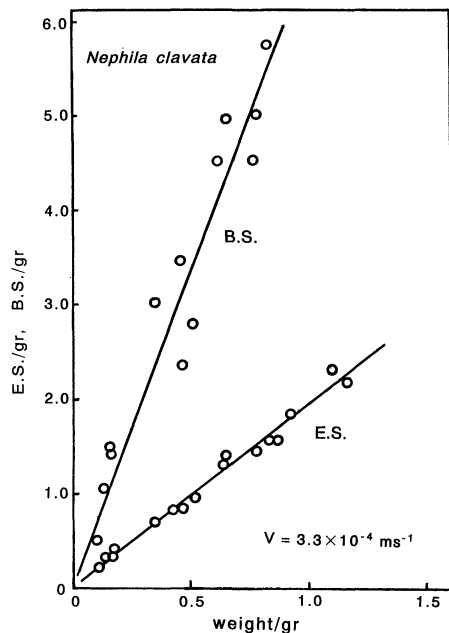


図 3. Relationship between the elastic limit strength ES and breaking strength BS for *Nephila clavata* spider's draglines and the spider's weight.

ゆっくりと釣り上げるのである。まさに、蜘蛛が糸の強さを十分に認識していると思われないのである。また、蜘蛛が捕獲した昆虫を直ぐに食べないで、保存するとき、獲物を巣から糸でぶら下げる。この時のぶらさげる糸の本数も、獲物の重さに対応した強度を確保しているのである。

## 4. 安全性

### 4.1 安全性と効率性

蜘蛛に接していて、しばしば自然界のすばらしさに驚かされる。そもそも、300 万年という人類の歴史に比べ、蜘蛛は 4 億年という極めて長い進化の歴史を持っている。この気の遠くなる長い期間に、進化の産物として環境に適応した機能を持つ蜘蛛糸が出来あがってきたとしても不思議ではない。その結果が、命綱である牽引糸の弾性限界強度が体重の約 2 倍ということである。これは、2 本のフィラメントからなる牽引糸が体重を最大の効率でもって支えていることになる (Osaki 1996a, 1996b)。まさに、牽引糸が古くから命綱と言われていたことの意味が理解される。ここで得られた自然界の経験則は、エレベーター、橋、飛行機、紐、家屋、トンネルなどの種々の工業用素材や構築物の安全率に対して、重要な示唆を与えてくれる。蜘蛛の糸は、長い進化の歴史から、最小の安全率で、かつ、最大の効率で設計されているものと思われる。糸が太ければ安全性がアップするが、多くのタンパク質とそれを生み出す無駄なエネルギーが必要とされ、しかも、空中での動きが鈍くなる。もちろん、糸が細すぎると、エネルギー面では効率的だがすぐに切れてしまう危険性がある。したがって、最小の安全性で最大の効率性を持つ牽引糸によって初めて、蜘蛛の俊敏な活動性が保証されることになる。

たとえば、家を造るとき、屋根を支える柱を太くすると安全性は上がるが、費用がかかりすぎ、また、使用できる空間が減ってしまう。また、つり橋に関して、中央支間長（セントースパン）が世界最長（1991 m）を持つ明石海峡大

橋では、従来の引張り強度（160 kgf/cm<sup>2</sup>）のワイヤーを使用すると、橋の重さ、ワイヤーの重さや風による振動の問題で、メインケーブルが 4 本も必要となり、複雑な構造のため工費、工期も非常に増大することがわかった。そのために、引張り強さ 180 kgf/mm<sup>2</sup> とアップした高強度鋼線からなるケーブルを左右 1 本ずつ合計 2 本を使用して解決したのである。このように、エネルギー的に効率性は考慮されているが、安全率の問題においては未だ課題が残ると思われる。

### 4.2 究極の数字 “2”

蜘蛛の牽引糸から来た “2” という数字は、安全性を考える上で、極めて重要なものと思われる。記念写真の最低のシャッター回数や影武者の存在も “2” である。世の中では替りが多いほど良いが、維持費がかかる。最低の安全性確保と効率性との兼ね合いから、やはり数字の “2” が重要な意味を持つてくるのである。1996 年の後半に、イギリスとフランスの間のドーバー海峡の海底トンネルで事故が起り、海底トンネルが全面通行止めになってしまった。まさに、交通における “ライフライン” が止まってしまった。その時、科学雑誌である “ネイチャー” に掲載された蜘蛛の安全性に関する著者の論文 (Osaki 1996a) がヨーロッパでタイムリーに議論されたことがある。

### 4.3 直列的と並列的に安全性を評価

安全性には、並列的な考えと直列的な考えがある。たとえば、家を造るとき、屋根を何本かの柱で支える場合や蜘蛛の牽引糸を構成するフィラメントなどは、明らかに並列的な安全性の考えである。ところが、総合的に安全性を考える時には、直列的な考えも導入しなければならない。家の建造でも、いくら柱の構造が立派でも、基礎や地盤の問題が残っている。同様に、蜘蛛が木から降りたり、“こしき” にぶら下がる場合でも、牽引糸の先端である “付着盤” がしっかりとくっついていないことが極めて重要なポイントなのである。あわてて、蜘蛛が飛び降りる時でも付着盤がしっかりとくっついていないと、いくら牽引糸が丈夫でも命を落としてしま

うことになる。したがって、蜘蛛の安全性には、並列と直列の考え方を取り入れたトータルの発想が必要である。

## 5. 蜘蛛から学ぶサイエンス

4億年という長い進化の歴史を持つ蜘蛛から、危険と隣り合せである安全性に関して、我々は極めて重大な示唆を得ることができる。絶えず、死と直面している蜘蛛の素晴らしく俊敏な活動の様子を眺めるにつけ、長い歴史を持つ進化の産物として、牽引糸は最小の安全性で最高の効率性を持っているに違いないと思われる。

20世紀末では、ハイテクという言葉が流行り、人間はどのような技術でも編み出せると錯覚に陥った。実際に、如何にハイテクという言葉が頻繁に使おうとも、現実世界の技術の進展はそれほど容易ではないのである。このようなことから、我々人間は、21世紀に向けて安全性を始め、まだまだ自然界から多くのサイエンスやテクノロジーを学ぶことが必要であると思っている。

## References

- Becker, M. A., D. V. Mahony, P. G. Lenhert, R. K. Eby, D. Kaplan & W. W. Adams, 1995. X-ray Moduli of Silk Fibers from *Nephila clavipes* and *Bombyx mori*. *Silk Polymers* (Am. Chem. Soc., Washington DC), 185-195.
- Cunniff, P. M., S. A. Fossey, M. A. Auerbach & J. W. Song, 1995. Mechanical Properties of Major Ampulate Gland Silk Fibers Extracted from *Nephila clavipes* Spiders. *Silk Polymers* (Am. Chem. Soc., Washington DC), 234-251.
- Denny, M. W., 1976. The physical properties of spider's silk and their role in the design of orb-webs. *J. exp. Biol.*, **65**: 483-506.
- Work, R. W. & N. Morosoff, 1982. A physico-chemical study of the super contraction of spider major ampullate silk fibers. *Text. Res. J.*, **46**: 349-356.
- Osaki, S., 1989a. Thermal properties of spider's thread. *Acta Arachnologica*, **37**: 69-75.
- Osaki, S., 1989b. Seasonal Change in Color of Spiders' Silk. *Acta Arachnologica*, **38**: 21-28.
- Osaki, S., 1990. Orientation test. *Nature*, **347**: 32.
- Osaki, S., 1994. Aging of Spider Silks. *Acta Arachnologica*, **43**: 1-4.
- Osaki, S., 1996a. Spider silk as mechanical lifeline. *Nature*, **384**: 419.
- Osaki, S., 1996b. 蜘蛛の糸：その蛋白質科学。蛋白質・核酸・酵素, **41**: 2108-2116.
- Osaki, S., 1997. Effects of Ultraviolet Rays and Temperature on Spider Silks. *Acta Arachnologica*, **46**: 1-4.